

Reconstructie van de aardbevingsgeschiedenis van Aysén fjord (Zuid-Chili) aan de hand van seismische stratigrafie en de analyse van een sedimentkern

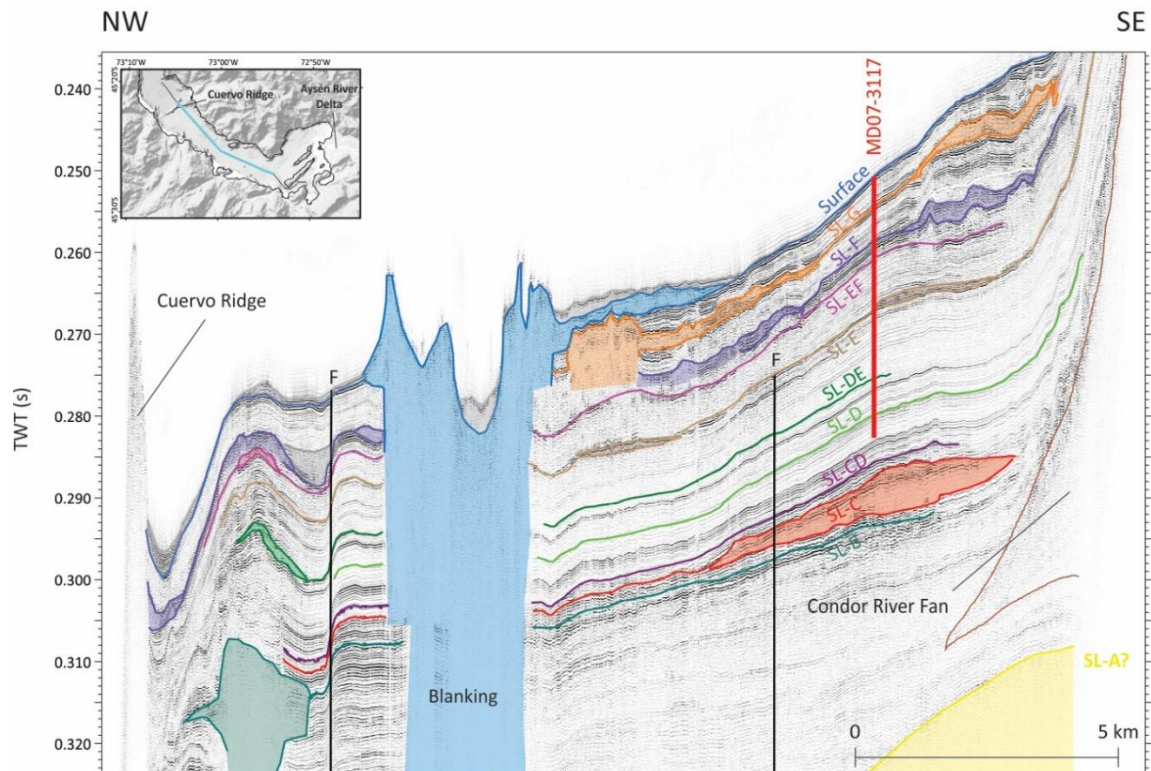
Wils Katleen¹

¹ Renard Centre of Marine Geology, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ghent University, Krijgslaan 281-S8, 9000 Gent, Belgium
E-mail: katleen.wils@ugent.be

Chili is een van de seismisch meest actieve zones ter wereld en wordt op regelmatige basis getroffen door zeer zware aardbevingen. Deze zijn niet alleen het gevolg van de nabij gelegen subductiezone, maar worden ook gegenereerd door de Liquiñe-Ofqui Fault Zone (LOFZ). Deze laatste is een actieve, dextrale horizontaalverschuivingsbeuk ('strike-slip') die het noordelijk gedeelte van het Chileense fjordland doorkruist (Cembrano et al., 1996). In 2007 werd deze breukzone geteisterd door een aardbevingszwerm, met het epicentrum van de zwaarste schok (21 april, Mw 6.2) gelegen in Aysén fjord (Legrand et al., 2011). De intensiteit van de seismische schokken was zo hoog dat tientallen landverschuivingen en andere massabewegingen plaatsvonden en uitmondde in het fjordbekken (Naranjo et al., 2009). Deze vervormden de aanwezige sedimenten op de fjordbodem en lieten op deze manier een afdruk na die duizenden jaren later bewaard blijft in de vorm verormde bodemsedimenten, al dan niet geassocieerd met (mega)turbidieten. Dergelijke afzettingen (algemeen Mass Transport Deposits genoemd, MTDs) kunnen op eender welk ogenblik in de geologische tijd worden gegenereerd en kunnen worden teruggevonden met behulp van onder andere seismische profielen en sedimentkernen. Op deze manier zijn ze ideaal voor paleoseismische reconstructies.

De aardbevingsgeschiedenis van Aysén fjord werd gereconstrueerd aan de hand van een dicht netwerk van hoge resolutie seismische profielen van zowel TOPAS, sparker als airgun seismische bronnen. Deze werden bekomen tijdens twee campagnes: een eerste in 2009, uitgevoerd door het Renard Centre of Marine Geology (RCMG, Universiteit Gent) en een tweede tijdens de DETSUFA cruise in 2013 onder leiding van de Universitat de Barcelona. Aan de hand van deze profielen werden verschillende MTDs teruggevonden in de sedimentaire opvulling van de fjord en kon worden geëvalueerd of deze al dan niet veroorzaakt werden door seismische activiteit. Bijkomstig werd ook gebruik gemaakt van een beschikbare sedimentkern van ongeveer 20 meter lang, genomen in 2007 door R/V Marion Dufresne. Deze kern bevat verschillende tefras en turbidieten die correlatie met de seismische data toelieten. Het organisch materiaal dat aanwezig is in de sedimenten kon worden gedateerd met behulp van koolstofdatering en op die manier bijdragen tot het opstellen van een ouderdomsmodel voor de kern. De link tussen de seismische profielen en de sedimentkern kon dan uiteindelijk leiden tot een aantal gedateerde aardbevingen die Aysén fjord gedurende de geologische tijd getroffen hebben. Om meer informatie te krijgen over de locatie én sterkte van deze aardbevingen werden grondbewegingen gemodelleerd. Hierbij werd rekening gehouden met het feit dat een bepaalde intensiteit van grondbewegingen vereist is om een massabeweging te kunnen veroorzaken.

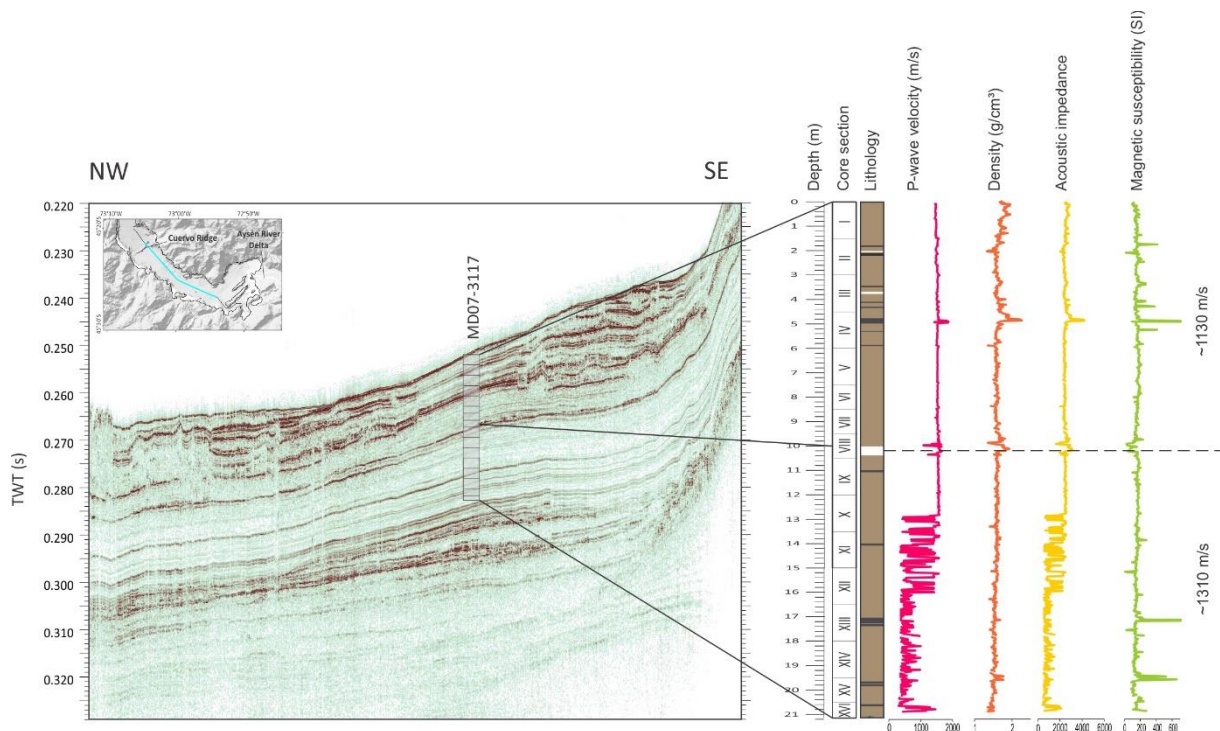
Na analyse van de seismische profielen zijn elf stratigrafische niveaus ontdekt waarop MTDs terug te vinden zijn (Figuur 1). Deze zijn te herkennen door hun chaotisch of transparant facies en een geometrie die veel verschillende vormen kan aannemen. Ze zijn meestal ook geconcentreerd langs de randen van het bekken waarin ze zijn afgezet (Moernaut et al., 2007). Eén van deze stratigrafische niveaus waarop afzettingen van massabewegingen te vinden zijn, is het oppervlakteniveau. Dit is het gevolg van de vervorming die de hoofschok van de aardbevingszwerm uit 2007 veroorzaakt heeft. Dieper in de invulling van de fjord worden gelijkaardige structuren teruggevonden op locaties verspreid doorheen de hele fjord. Het feit dat op hetzelfde stratigrafische niveau op verschillende locaties in de fjord dergelijke structuren kunnen worden teruggevonden, wijst erop dat deze vermoedelijk veroorzaakt geweest zijn door aardbevingen.



Figuur 1: Overzicht van de verschillende stratigrafische niveaus waarop MTDs werden teruggevonden, aangeduid op één van de TOPAS seismische profielen (uitgedrukt in two-way-travel time, TWT). De MTDs zelf zijn aangeduid met gekleurde vlakken. Wanneer de basis niet geobserveerd werd ('blanking') is de afzetting niet afgebakend. De locatie van de sedimentkern is weergegeven (rood, MD07-3117), alsook enkele breukstructuren (zwart, F).

Aangezien de seismische profielen aantonen dat er verschillende niveaus zijn in de fjord waarin MTDs kunnen worden teruggevonden, moeten deze ook kunnen worden teruggevonden in de sedimentkern. De meest voorkomende expressie van dergelijke afzettingen is door de aanwezigheid van een turbidiet, gekenmerkt door een piek in densiteit en magnetische susceptibiliteit (St-Onge et al., 2012), alsook door een visueel zichtbare verstoring van de gewone sedimentatie in de fjord door bijvoorbeeld een abrupte kleur en/of textuurverandering. De kern bevat zeer veel van dergelijke laagjes en verder onderzoek met behulp van smeer slides kon uitwijzen of het om turbidieten of tefra-laagjes ging. Het voorkomen van tefra in de fjord is niet geheel onverwacht aangezien de omgeving van Aysén fjord gekenmerkt wordt door de aanwezigheid van verschillende vulkanen. Vulkanisch materiaal kan dan op twee manieren in de fjord terecht komen. Enerzijds kan tefra terechtkomen in het drainagegebied van één van de voedende rivieren van de fjord, en wordt het op die manier getransporteerd naar het bekken. Anderzijds is voor sommige historische erupties geweten dat Aysén fjord in het verspreidingsgebied van tefraneerslag gelegen is. Zo kan tefra dus ook rechtsreeks in de fjord worden afgezet (Naranjo and Stern, 1998, 2004).

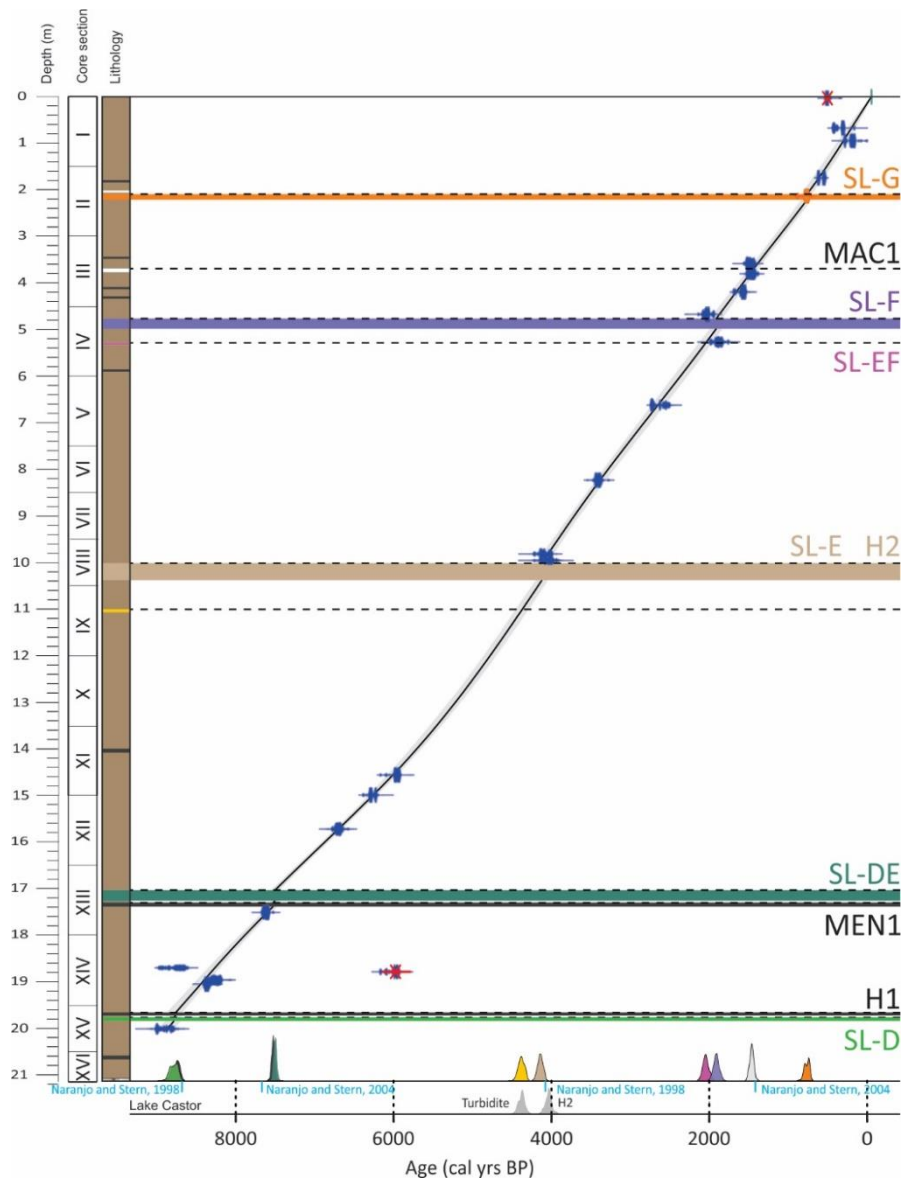
Een van de belangrijkste elementen bij een paleoseismische reconstructie is het bepalen van ouderdommen. Voor dit onderzoek werd hiervoor gebruik gemaakt van de sedimentkern waarin voldoende organisch materiaal aanwezig was voor koolstofdatering. Om het opgestelde ouderdomsmodel te kunnen interpreteren in termen van aardbevingsgeschiedenis was het cruciaal om de kern te correleren met de seismische profielen. Dit kon worden bereikt rekening houdend met het feit dat de zichtbare reflectoren op de profielen een gevolg zijn van veranderingen in akoestische impedantie en dus van densiteit en/of de geluidssnelheid. Dit leidde uiteindelijk tot een robuuste correlatie en een duidelijke link tussen de aanwezige turbidietlaagjes in de kern en de stratigrafische niveaus met MTDs terug te vinden in de seismische profielen (Figuur 2).



Figuur 2: Correlatie tussen één van de seismische profielen en de sedimentkern. Lithologie van de kern is schematisch weergegeven samen met de curves voor de snelheid van P-golven (roze), dichtheid (oranje), akoestische impedantie (geel) en magnetische susceptibiliteit (groen).

Dankzij de correlatie tussen de kern en de seismiek kon elk van de stratigrafische niveaus gerelateerd worden aan een *event horizon* uit de kern. Bijkomend konden de verschillende tefra-laagjes in de kern met behulp van geochemische analyse gelinkt worden aan gekende prehistorische erupties, wat leidde tot een extra controle op het ouderdomsmodel opgesteld met behulp van de koolstofdateringen (Figuur 3). Uit de correlatie bleek dat één van de seismische niveaus met MTDs gerelateerd was aan een vulkanische eruptie eerder dan aan een aardbeving. Anderzijds bleek één van de turbidietlagen uit de kern niet overeen te komen met één van de stratigrafische niveaus, maar werd op basis van de sterke gelijkenissen tussen dit laagje en de overige turbidietlagen verondersteld dat ook deze turbidiet seismisch getriggerd werd. Na applicatie van het ouderdomsmodel op de kern kon worden afgeleid dat Aysén fjord gedurende het Holoceen zeker acht keer getroffen werd door een zware aardbeving en vermoedelijk nog minstens driemaal in de tijdsperiode tussen deglaciatie van de fjord en het begin van het Holoceen.

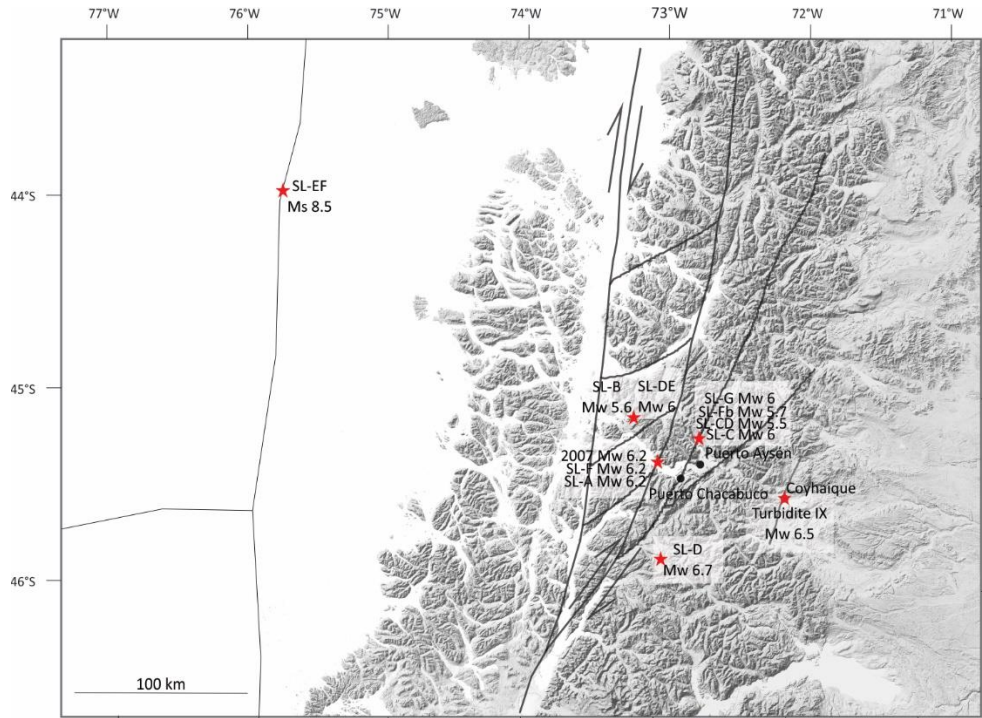
Om een beter idee te krijgen over de mogelijke sterkte en locatie van deze MTD-genererende aardbevingen werd gebruik gemaakt van grondbewegingsmodellering (o.a. Bakun en Wentworth, 1997 en Barrientos, 1980). Dit toonde aan dat de epicentra van dergelijke aardbevingen nooit verder dan ongeveer 100 km van de fjord verwijderd kunnen zijn aangezien ze dan niet meer in staat zijn om grondbewegingen te genereren die voldoende intensiteit hebben om een massabeweging te veroorzaken. De uitzondering hierop zijn subductie-aardbevingen; deze vinden plaats op meer dan 100 km van de fjord maar vereisen oppervlaktemagnitudes van 8 of hoger om massabewegingen in het bekken te veroorzaken. Zulke magnitudes worden echter slechts zelden bereikt. Dit liet toe om zones af te bakenen rondom de fjord waarin de epicentra mogelijk gesitueerd waren, rekening houdend met de verdeling van de MTDs in het fjordbekken. Hierbij geldt dat hoe verder het epicentrum verwijderd is van de fjord, hoe hoger de magnitude moet zijn om nog een gelijkaardig patroon aan MTDs te genereren als een aardbeving van lagere magnitude die dicht bij de fjord gelokaliseerd is. Binnen deze zones is de locatie van de LOFZ en zijn vertakkingen bekend. Aan de hand van deze locaties werden dan veronderstellingen gemaakt over welke breuken verantwoordelijk konden zijn voor welke aardbevingen en dus de geobserveerde MTDs in de fjord veroorzaakt hebben. Hieruit kon worden geconcludeerd dat slechts één van de prehistorische events mogelijk gerelateerd was aan subductie, terwijl de overige negen gerelateerd zijn aan de LOFZ (Figuur 4).



Figuur 3: De verschillende secties in de kern, hun lithologie en het ouderdomsmodel met daarop de verschillende stratigrafische niveaus aangeduid die werden teruggevonden in de seismische profielen (zie Figuur 1) en de tefra-laagjes die konden worden gelinkt aan een historische eruptie. Ouderdoms distributies voor al deze niveaus zijn onderaan weergegeven, in combinatie met de gekende ouderdom uit de literatuur van enkele historische vulkanische erupties en de turbidiet teruggevonden in een nabij gelegen meer (S. Bertrand, persoonlijke communicatie).

Algemeen gesteld werd het gebied rondom Aysén fjord tijdens het Holocene ongeveer één keer per 2000 jaar getroffen door een zware aardbeving gerelateerd aan de LOFZ, hoewel zeer grote afwijkingen van dit gemiddelde interval optreden. Dit is echter een relatief lage waarde gezien de grote spanning die opgebouwd wordt in de regio door subductie. Dit kan worden verklaard door de beperkte regio waarin aardbevingen in staat zijn om voldoende grondbewegingen te veroorzaken om een spoor na te laten in de fjordsedimenten. Aardbevingen die plaatsvinden op meer dan ongeveer 100 km afstand van de fjord zullen namelijk nooit kunnen worden teruggevonden in de sedimenten.

Dit onderzoek heeft nogmaals aangetoond dat fjorden een ideale setting vormen om paleoseismisch onderzoek te verrichten en waarom het belangrijk is om (hoge resolutie) seismische data te combineren met een sedimentkern om optimale resultaten te bekomen. Zonder sedimentkern is het namelijk onmogelijk om na te gaan wat de oorsprong van een MTD is of wat zijn ouderdom is. Anderzijds, een sedimentkern alleen kan de distributie van de verschillende MTDs doorheen een bekken niet visualiseren en er kan dus niet worden nagegaan of deze MTDs al dan niet seismisch getriggerd werden. De combinatie van beide methodes in dit onderzoek heeft ertoe geleid dat een gedetailleerde seismische historie van Aysén fjord succesvol kon worden opgesteld.



Figuur 4: Mogelijke epicentrumlocaties (rode sterren) van de verschillende aardbevingen die werden teruggevonden in de fjord met aanduidingen van de geschatte magnitude (Mw voor momentmagnitude, Ms voor oppervlaktemagnitude).

Referenties

- Bakun, W.H., Wentworth, C.M., 1997. Estimating earthquake location and magnitude from seismic intensity data. *Bulletin of the Seismological Society of America* 87, 1502–1521.
- Barrientos, S., 1980. Regionalización sísmica de Chile. MSc thesis, Universidad de Chile, Chile.
- Cembrano, J., Hervé, F., Lavenue, A., 1996. The Liquiñe-Ofqui fault zone: a long-lived intra-arc fault system in southern Chile. *Tectonophysics* 259, 55–66.
- Legrand, D., Barrientos, S., Bataille, K., Cembrano, J., Pavez, A., 2011. The fluid-driven tectonic swarm of Aysén Fjord, Chile (2007) associated with two earthquakes (Mw=6.1 and Mw=6.2) within the Liquiñe-Ofqui Fault Zone. *Continental Shelf Research* 31, 154–161.
- Moernaut, J., De Batist, M., Charlet, F., Heirman, K., Chapron, E., Pino, M., Brümmer, R., Urrutia, R., 2007. Giant earthquakes in South-Central Chile revealed by Holocene mass-wasting events in Lake Puyehue. *Sedimentary Geology* 195, 239–256.
- Naranjo, J.A., Arenas, M., Clavero, J., Muñoz, O., 2009. Mass movement-induced tsunamis: main effects during the Patagonian Fjordland seismic crisis in Aysén (45° 25'S), Chile. *Andean Geology* 36, 137–145.
- Naranjo, J.A., Stern, C.R., 1998. Holocene explosive activity of Hudson Volcano, southern Andes. *Bulletin of Volcanology* 59, 291–306.
- Naranjo, J.A., Stern, C.R., 2004. Holocene tephrochronology of the southernmost part (42°30'–45°S) of the Andean Southern Volcanic Zone. *Revista geológica de Chile* 31, 225–240.
- St-Onge, G., Chapron, E., Mulsow, S., Salas, M., Viel, M., Debret, M., Foucher, A., Mulder, T., Winiarski, T., Desmet, M., Costa, P.J.M., Ghaleb, B., Jaouen, A., Locat, J., 2012. Comparison of earthquake-triggered turbidites from the Saguenay (Eastern Canada) and Reloncavi (Chilean margin) Fjord: Implications for paleoseismicity and sedimentology. *Sedimentary Geology* 243–244, 89–107.